



窄带通信系统中信道编码系统的改进^{*}

王艳君¹, 岳 婧², 崔 雪²

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081; 2. 西安电子科技大学 西安 710071)

摘 要: 由于卷积码具有编译复杂度低、易于实现的特点, 在目前的实际通信系统中被广泛应用, 但一些问题也随之而来。在需要长距离传输、通信质量要求很高的战术通信环境下, 使用卷积码需要较高的发射功率, 这导致了额外的能量损耗, 限制了信息的传输距离, 降低了通信系统的性能; 而使用高性能信道编码可以在达到相同通信质量的同时降低所需的传输能量, 进而改善系统整体性能。因此, 通过研究 Turbo 码和 LDPC 码的基本原理, 并结合实际通信系统的特点设定参数进行仿真, 证明了 Turbo 码和 LDPC 码与卷积码相比, 在相同的通信环境下具有更好的性能, 能够有效地提高战术通信系统中信道编码系统的编码效率。

关键词: 卷积码; Turbo 码; 低密度校验码; 编码效率

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.05.020

Improvement of Channel Coding System in Narrowband Communication System

Wang Yanjun¹, Yue Jing², Cui Xue²

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: With the advantages of low complexity and easy implementation, convolution code is widely used in practical communication systems. However, the requirement of higher transmission power in tactical environment of long distance transmission and higher quality of communication, results in additional energy loss, limited transmission range and relatively high bit error rate in receiver. High quality channel coding can achieve the same communication quality with lower power consumption, improving the performance of the whole system. So the basic principles of Turbo code and LDPC code were studied. The results of simulation combined with the characteristics of actual communication system, show that Turbo code and LDPC code have better performances than convolution code under the same conditions and could be used to improve the channel coding efficiency in tactical communication system.

Key words: convolution code, Turbo code, LDPC code, coding efficiency

1 引言

1948 年, 香农(Shannon)在他的论文中提出信道编码定理^[1], 具有高纠错能力的码型成为研究热点, 信道编码技术已成为现代通信理论和无线通信中的关键技术。目前, 很多实际使用的通信系统(如战术通信系统、无人机等)使

用卷积码作为信道编码。卷积码具有较低的编译码复杂度, 但同时其高信噪比限制也成为影响通信系统性能的主要因素。上述系统在误码率为 10^{-5} 条件下, 信噪比通常大于 5 dB。对于日益提高的通信传输速率、范围及通信质量方面的要求, 卷积码已难以满足, 迫切需要引入新的信道编码技术对现有的通信系统进行升级改造。与此同时, 对

^{*} 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA01A505, No.2012AA01A508)



具有高纠错能力的码型的理论研究已非常多,将其应用在实际通信系统中,将有助于改善现有通信系统的整体通信性能,实现通信系统的改造升级。

目前,得到广泛关注和研究的纠错能力码主要有 Turbo 码和低密度校验(long density parity check, LDPC)码。

1993 年,法国的 Berrou C 等人提出了 Turbo 码的编码方案。Turbo 码的提出在信道编码领域取得了突破性进展。它能够在长 Turbo 码时逼近香农极限,同时译码复杂度也可以接受,可在实际硬件水平下进行应用。Turbo 码的关键之处在于其独特的编码结构和全新的译码思想,具体为:在子编码器中采用了反馈型的系统卷积码,并且在子编码器之间加入了交织器,减少了各组编码信息之间的相关性,充分模仿了随机编码的思想与形式;同时 Turbo 码译码算法引入了软输入、软输出的概念和迭代译码的思想。Turbo 码已在通信系统中得到了广泛应用,其理论研究已经逐渐成熟。

LDPC 码最初由 Gallager 于 1962 年提出,直至 1995 年才被重新发现并得到肯定和关注。LDPC 码是一种线性分组码,由于其校验矩阵具有稀疏性,致使其译码复杂度与码长保持线性关系,即当码长较长时,仍可进行有效的译码,这就解决了长 Turbo 码难以实现的高译码复杂度问题。

本文采用理论分析和计算机仿真相结合的方法,对目前最常用的 3 种信道编码方法(卷积码、Turbo 码和 LDPC 码)的各项参数和性能进行研究,并通过仿真进行对比,最后针对 3 种信道编码各自的特点,探讨其在实际通信系统性能升级中的应用。

2 窄带通信系统模型

窄带通信系统架构如图 1 所示。

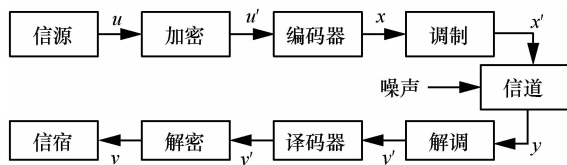


图 1 窄带通信系统架构

窄带通信系统覆盖广阔,作战地区的通信业务量在短时间内可以快速上升,呈现出极大的突发性,通信流量远远大于非作战地区的流量。目前的窄带通信系统中,使用卷积码作为信道编码。

根据窄带通信系统的特点,构造了如图 2 所示的信道仿真模型。本文对卷积码、Turbo 码和 LDPC 码的研究均在此模型下进行。

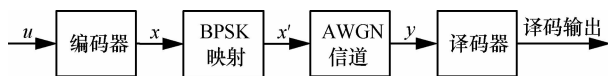


图 2 AWGN 信道仿真模型

信道模型采用相干 BPSK 调制,AWGN 信道噪声服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布,信道特征参量是噪声方差 σ^2 。编码器输出 $x \in \{0, 1\}$; 经过 BPSK 的调制映射式 $x' = 1 - 2x$, 得到 $x' \in \{-1, 1\}$; 再经过 AWGN 信道, 输出 $y = x' + n$, 其中, n 是均值为 0、方差为 σ^2 的独立高斯噪声的采样值; 最后, 译码器根据接收到的序列 y 估计发送序列 u 并得到译码输出。

3 编译码原理

卷积码编码是将发送的信息序列通过一个线性、有限状态的移位寄存器产生码字。目前,最佳译码方式是建立在最大似然译码基础上的 Viterbi 译码算法,其特别之处在于利用了卷积码的网格图结构,从而大大降低了译码复杂度。在编码或译码过程中,卷积码当前的码元状态与前后码元都有关联,因此,其在纠正突发错误时性能良好。卷积码编码约束长度越大,其纠错性能越好,但译码复杂度和时延也越大。

Turbo 码是在卷积码基础上的改进升级,由两个循环系统递归卷积码并行级联而成^[2],译码采用迭代的串行译码。Turbo 码使用交织器使信息序列随机化,增加各码字间的重量,提高 Turbo 码的抗干扰能力。在交织器的设计中, Turbo 码长度与帧长一致或是帧长的整数倍。Turbo 码误码率一般随码率的降低而降低,相同条件下,迭代次数增多,误码率降低,但同时译码计算量增加^[3]。编码的帧长越长,译码性能越好,但也会增加译码时延。

LDPC 码的校验矩阵具有稀疏性,各码字之间的线性相关性很小,采用迭代译码,其译码算法的基本思想是置信传播思想,即信息节点和校验节点之间互相传递和更新可靠性信息。该算法的关键在于节点 A 传递给节点 B 的可靠性信息时,要独立于其从节点 B 接收到的信息,同时要对该信息进行有效的精度控制。LDPC 码性能的优劣是其结构设计和译码算法的综合结果^[4]。本文使用参考文献[5]中的构造方法构造校验矩阵,采用和积译码算法进行译码。

4 仿真与性能分析

窄带通信系统中的信道编码系统使用信息位长度为 512 bit,码率 $R=1/2$ 的卷积码,具体参数是:卷积码(2,1,7)对应生成多项式 $g=(133\ 171)$ 和卷积码(2,1,9)对应生成多项式 $g=(561\ 753)$ 。采用 Viterbi 译码算法。下面分两种情况

将 Turbo 码和 LDPC 码与卷积码进行对比。

4.1 相同码率、相同码长

Turbo 码的码率 $R=1/2$, 交织器长度为 512 bit, 采用 BCJR 译码算法; LDPC 码的码率 $R=1/2$, 采用和积译码算法、BPSK 调制方式。码率 $R=1/2$ 时, 卷积码、Turbo 码与 LDPC 码在 AWGN 信道下的性能曲线如图 3 所示, 在瑞利衰落信道下的误码率性能曲线如图 4 所示。

由图 3 可见, 当 $BER=10^{-5}$ 时, 卷积码 (2,1,7) 所需的信噪比为 4.05 dB, 而卷积码 (2,1,9) 所需的信噪比为 3.6 dB, 两者之间相差约 0.4 dB。由以上数据可以看出, 存储器的个数是影响卷积码误码性能的因素之一。在达到 $BER=10^{-5}$ 时, 存储器个数较多的卷积码 (2,1,9) 比卷积码 (2,1,7) 所需的信噪比更低。

在 AWGN 信道下, 码率 $R=1/2$ 的 Turbo 码所需的信噪比为 2.35 dB。LDPC 码 (1 056,528) 所需的信噪比为 2.2 dB。当码率 $R=1/2$, 达到 $BER=10^{-5}$ 时, Turbo 码和 LDPC 码比卷积码有约 1.3 dB 的性能提升。

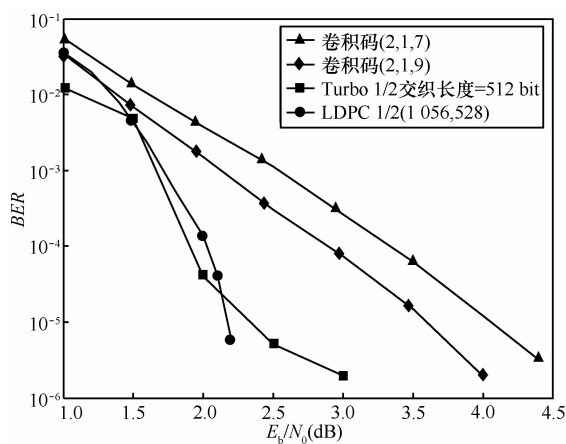


图 3 3 种信道编码在 AWGN 信道下的误码率性能曲线 ($R=1/2$)

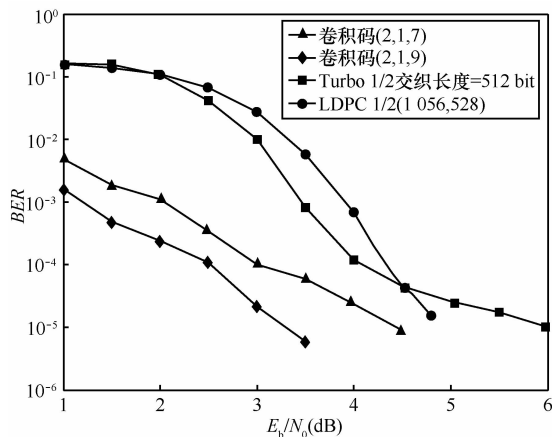


图 4 3 种信道编码在瑞利衰落信道下的误码率性能曲线 ($R=1/2$)

由此可见, 码率 $R=1/2$ 时, Turbo 码和 LDPC 码与卷积码相比, 具有更好的误码性能。实际应用时, 在相同发射功率下, 使用 Turbo 码和 LDPC 码会比卷积码获得更远的传输距离, 从而扩大通信覆盖范围。同样, 在固定传输距离的情况下, 使用 Turbo 码和 LDPC 码对发射功率的要求会相应降低, 使整体通信系统的性能得到改善。而由图 4 可见, 在瑞利衰落信道下, 码率 $R=1/2$ 时, Turbo 码和 LDPC 码与卷积码误码性能相差不大。

4.2 不同码率、相同码长

Turbo 码码率 $R=2/3$, 交织器长度为 683 bit, 采用 BCJR 译码算法; LDPC 码码率 $R=2/3$, 采用和积译码算法、BPSK 调制方式。码率 $R=2/3$ 时, 卷积码、Turbo 码与 LDPC 码在 AWGN 信道的性能曲线如图 5 所示, 在瑞利衰落信道下的误码率性能曲线如图 6 所示。

由图 5 可见, 当 $BER=10^{-5}$ 时, 卷积码 (2,1,7) 所需的信噪比为 4.05 dB, 而卷积码 (2,1,9) 所需的信噪比为 3.6 dB。码率 $R=2/3$ 时, Turbo 码所需的信噪比为 3.25 dB, LDPC 码

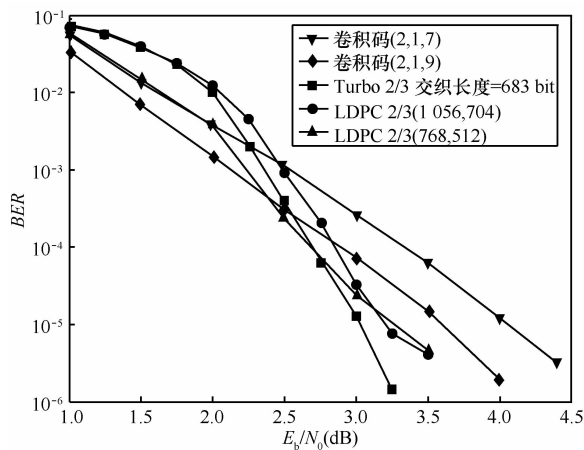


图 5 3 种信道编码在 AWGN 信道下的误码率性能曲线 ($R=2/3$)

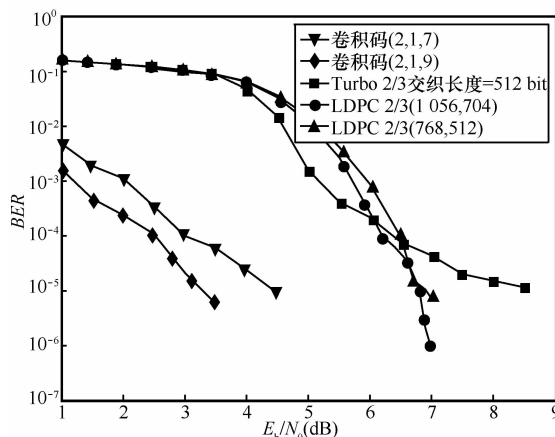


图 6 3 种信道编码在瑞利衰落信道下的误码率性能曲线 ($R=2/3$)



(768,512)所需的信噪比为 3.2 dB, LDPC 码(1 056,704)所需的信噪比为 3.05 dB。码率相同的情况下,在 BER 达到 10^{-5} 时, LDPC 码的码长越长,所需要的信噪比越小,即随着码长的增加, LDPC 码的性能越来越好。

由此可见,码率 $R=2/3$ 的 Turbo 码和 LDPC 码所需的信噪比分别比卷积码少约 0.55 dB 和 0.35 dB。由以上数据对比可知, AWGN 信道和瑞利衰落信道中,在保证码长相同的情况下,当 BER 达到 10^{-5} 时,码率 $R=2/3$ 的 Turbo 码和 LDPC 码与码率 $R=1/2$ 的卷积码相比,所需的信噪比更低,误码性能更好。并且因为码率较高,采用 Turbo 码和 LDPC 码可以极大地提高编码效率。由图 6 可知, Turbo 码和 LDPC 码性能差别不大,在高信噪比(大于 6.6 dB)时, LDPC 码性能优于 Turbo 码。

由以上数据对比可知,当传递相同长度的信息时,要达到同样的误码率, Turbo 码和 LDPC 码所需的冗余位要比卷积码少很多。也就是说,当发送同样长度的数据时,在相同误码率条件下, Turbo 码和 LDPC 码可以携带更多的信息。而码长和码率都相同时, Turbo 码和 LDPC 码的误码性能明显优于卷积码。实际应用时,在相同的信道环境和传输功率条件下,使用 Turbo 码和 LDPC 码会获得更高的数据传输速率,进而实现资源的有效利用。

在码长相同时,采用码率 $R=2/3$ 的 Turbo 码和 LDPC 码,比采用码率 $R=1/2$ 的卷积码多传输约 30% 的信息比特,获得更高的编码效率。

综合所有码率、码长可以看到,整体情况下 Turbo 码和 LDPC 码的性能要优于卷积码。实际应用时, Turbo 码和 LDPC 码可以提供更高的通信质量。从图 3~图 6 还可以看到, LDPC 码和 Turbo 码在短码长、高码率的情况下,性能依然优于卷积码。因此实际使用时,可以同时满足低发送功率、长传输距离、有效资源利用等多个条件,进一步改善通信系统性能^[6]。

5 应用建议

5.1 当前应用场景

卷积码由于结构简单、具有较强的纠错能力和比较简单的译码算法,在通信、信息传输等方面获得了十分广泛的应用。目前,很多实际通信系统(如战术通信系统、无人机、Thuraya 静止卫星移动通信系统、GSM 第 2 代地面移动通信系统等)均采用卷积码。

Turbo 码性能优于卷积码,在第 3 代地面移动通信系统

的 3 种标准中均得到了应用。如 cdma2000 系统中,高速率、对译码时延要求不高的辅助数据链路采用了 Turbo 编码方式;在 TD-SCDMA 系统中, Turbo 编码方案用来传输数据速率高于 32 kbit/s,且误码率为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 的数据业务。

LDPC 码优异的纠错性能和低译码复杂度,使其逐渐被世界各大通信公司采用,或提出作为新一代移动通信系统中的纠错抗干扰方案。目前,采用 LDPC 码的标准、通信系统有:无线广域网标准 IEEE 802.11e、欧洲的第 2 代数字电视传输标准 DVB-T2/C2/S2、无线局域网标准 IEEE 802.11n 以及美国 CCSDS 的近地和深空通信系统等。在未来的 4G 移动通信标准以及下一代卫星通信系统中, LDPC 码也是信道编码方案的有力竞争者。

5.2 应用特点

卷积码、Turbo 码和 LDPC 码携带的信息量对比如图 7 所示。由图 7 可以看出,码长相同时,码率 $R=2/3$ 的 Turbo 码和 LDPC 码均比码率 $R=1/2$ 的卷积码携带更多的信息;当携带相同长度的信息时, LDPC 码(768,512)比卷积码的码长短很多,性能优于卷积码,而 LDPC 码(960,640)与卷积码相比,码长短且携带信息多。

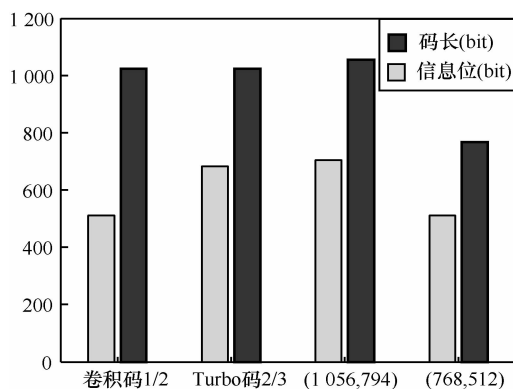


图 7 携带信息量对比

由图 7 和第 3 节的仿真及理论分析,总结如下:

- 卷积码简单易实现,其性能与其存储器个数有关,存储器越多,性能越好;
- Turbo 码和 LDPC 码无论从传输可靠性角度还是传输有效性角度,均优于卷积码;
- Turbo 码和 LDPC 码在所选码长相同时,性能差别不大;
- 在长 LDPC 码时译码复杂度低,有较大竞争力,同时, LDPC 码在高信噪比时,性能优于 Turbo 码。

对于窄带通信系统,选出了一些码型作为候选码,见表 1。根据不同的应用需求选择相应码型作为信道编码,可

表1 候选码参数

码型	码率	码参数
Turbo 码	1/2	交织长度 512 bit
	2/3	交织长度 683 bit
LDPC 码	1/2	(1 056, 528)
	2/3	(768, 512)
		(1 056, 704)

以有效地改进整个系统的性能。

在码长不改变的情况下,可以选择使用码率 $R=1/2$ 的 Turbo 码或 LDPC 码,可以在相同码率下获得更高的通信质量。即使提高 Turbo 码和 LDPC 码的码率,在一定范围内,通信质量依然优于使用卷积码时的情况。如选择码率 $R=2/3$ 的 Turbo 码或 LDPC 码 (1 056, 704),还可以在提高通信质量的同时获得更多的信息,提高信息传输效率。

在对传输效率要求苛刻的环境下,需要更有效地利用资源实现信息传输,因此可选择码率 $R=2/3$ 的 LDPC 码 (768, 512) 或 LDPC 码 (960, 640) 等,在规定传输信息长度的同时,提高信道编码的码率,进而提高实际通信系统的数据传输速率,即在相同时间可以传输更多的信息,满足作战地区短时间内迅速上升的通信业务量和通信流量的需求;同时可以使用相同的能量传递更多的信息,或传递相同的信息却只消耗较少的能量,有效改善战术通信系统的资源利用率。

另外,使用 Turbo 码和 LDPC 码可以在满足通信可靠性的前提下扩大通信范围。达到所要求的相同误码率时, Turbo 码和 LDPC 码所需的信噪比小于卷积码,因此以同样的功率发送信号,使用 Turbo 码和 LDPC 码作为信道编码时,信号可以传输更远的距离,使得战术通信系统能够覆盖广阔的地理范围。

其他类似于窄带通信系统的使用卷积码作为信道编码的通信系统,均可以考虑通过使用 Turbo 码或 LDPC 码代替卷积码,提升系统性能,获得更高的数据传输速率和更好的通信质量、更高的资源利用率、更广泛的通信覆盖范围。

5.3 应用瓶颈

Turbo 码性能优异,但当码长较长时, Turbo 码的应用受到限制。因为 Turbo 码的译码复杂度随着码长的增长呈指数增长,当为长 Turbo 码时,交织时延大大增加。所以一般情况下,长 Turbo 码的信道编码方案不采用 Turbo 码。而 LDPC 码的译码复杂度与码长呈线性关系,所以可采用 LDPC 码对长 Turbo 码进行编码。

LDPC 码通常通过构造 LDPC 码的校验矩阵、转换生成矩阵进行编码,其应用瓶颈在于其编码复杂度跟码长成二次

方关系,不利于硬件实现。该问题的解决方法在于寻找特殊结构的校验矩阵构造 LDPC 码,如双对角准循环 LDPC 码等。

Turbo 码和 LDPC 码的研究已经日趋成熟,其优异的纠错性能已得到充分的肯定和认可,可以预见,它们在未来的通信中将占据一席之地。

6 结束语

卷积码的性能优异,编译码复杂度低,在很多方面得到了应用。本文将在窄带通信系统中使用的卷积码与 Turbo 码和 LDPC 码进行了对比,发现 Turbo 码和 LDPC 码不仅比卷积码的误码性能更优异,而且在相同的信道环境下,可以传递更多的信息。因此在窄带通信系统中,使用 Turbo 码和 LDPC 码取代卷积作为信道编码,可以改造和升级现有的通信系统,使之满足高速的数据通信、高效的资源利用和广阔的覆盖范围等要求。

参考文献

- 1 Lin S, Costello D J 著. 晏坚, 何元智, 潘亚汉译. 差错控制编码(原书第2版). 北京: 机械工业出版社, 2007
- 2 马建, 邵朝. Turbo 码及其译码算法研究. 西安邮电学院学报, 2010(5):38~42
- 3 王新梅, 肖国镇. 纠错码——原理与方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001
- 4 雷婷, 张建志. LDPC 编译码算法分析. 无线电工程, 2012(10): 8~10
- 5 IEEE Std802.16e-2005.Amendment 2 and Corrigendum 1 to IEEE Std 802.16-2004, 2005
- 6 吴沫, 杨华, 卢伟. 几种信道编码方式的编码增益比较分析. 通信技术, 2007(11): 121~122

[作者简介]



王艳君,男,中国电子科技集团第五十四研究所卫星通信与广播电视专业部卫星移动通信室主任,长期从事卫星移动通信、卫星抗干扰技术研究工作。

岳婧,女,西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为信息传输与编码理论。

崔雪,女,西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为信道编码理论。

(收稿日期:2013-05-02)